

стью включаются в алгоритм метода в соответствии с основной целью — получить непрерывное решение во всей области изменения параметра. Физически разрывная задача формально превращается при этом в непрерывную, что и ведет к уравнениям гидродинамики с макропараметрами, не отвечающими реальной физической ситуации, и, вообще говоря, к другим коэффициентам переноса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жигулев В. Н. Об уравнениях физической аэродинамики // Инж. журн. — 1963. — Т. 3, вып. 1.
2. Жигулев В. Н., Кузнецов В. М. Некоторые проблемы физической аэродинамики // Тр. ЦАГИ. — 1969. — Вып. 1136.
3. Валландер С. В., Нагнибеда Е. А., Рыдалевская М. А. Некоторые вопросы кинетической теории химически реагирующей смеси газов. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1977.
4. Кузнецов В. М. Неравновесные процессы в многофазных системах // Механика неоднородных сред. — Новосибирск, 1981.
5. Кузнецов В. М., Кузнецов М. М. Многотемпературные модели в задачах неоднородных течений релаксирующего газа // ЧМСС. — 1980. — Т. 11, № 3.
6. Бармашенко Б. В., Кузнецов В. М., Кузнецов М. М. Неравновесная система газ — поверхность — твердое тело в задачах релаксационной газовой динамики // ПМТФ. — 1983. — № 2.
7. Кузнецов В. М., Кузнецов М. М. Некоторые проблемы неравновесной газовой динамики, кинетики и катализа в течениях дисперсных сред с внутренними степенями свободы // Уч. зап. ЦАГИ. — 1984. — Т. 15, № 4.
8. Лунькин Ю. П., Мымрин В. Ф. Применение кинетической теории для получения замкнутой системы уравнений динамики газовзвеси // Письма в ЖТФ. — 1979. — Т. 5, вып. 3.
9. Черниньяни К. Теория приложения уравнения Больцмана. — М.: Мир, 1978.
10. Кузнецов М. М. Кнудсенский слой в течении с двухтемпературной релаксацией // ПМТФ. — 1972. — № 6.
11. Кожушнер М. А., Шуб Б. Р. Вероятность образования и время жизни молекул в колебательно-возбужденном состоянии при адсорбции // Нестационарные и неравновесные процессы в гетерогенном катализе. — М.: Наука, 1978. — Вып. 17.
12. Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Физическая кинетика. — М.: Наука, 1979.
13. Pai S. I. Fundamental equation of a mixture of a gas and small spherical solid particles from simple kinetic theory // Rev. roum. sci. techn. Sér. mec. appl. — 1974. — V. 19, N 4.
14. Шидловский В. П. Введение в динамику разреженного газа. — М.: Наука, 1965.
15. Хейз У. Д., Пробстин Р. Ф. Теория гиперзвуковых течений. — М.: ИЛ, 1962.
16. Коган М. Н. Динамика разреженного газа. — М.: Наука, 1967.
17. Кузнецов В. М., Кузнецов М. М. Об одной газодинамической модели двухфазного течения с сильной уроневои неравновесностью // Тр. ЦАГИ. — 1978. — Вып. 1932.
18. Чепмен С., Каулинг Т. Математическая теория неоднородных газов. — М.: ИЛ, 1960.
19. Кузнецов В. М. Кинетические коэффициенты в теории двухтемпературной колебательной релаксации // Изв. АН СССР. Механика. — 1965. — № 3.
20. Kuscer I. Reciprocity in scattering of gas molecules by surfaces // Surface Sci. — 1971. — V. 25, N 2.
21. Коган М. Н., Макашев Н. К. О построении уравнений газодинамики для многоатомных газов с произвольным отношением скоростей упругих и неупругих процессов // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1978. — № 2.
22. Струминский В. В. Влияние диффузионной скорости на течение газовых смесей // ПММ. — 1974. — Т. 38, вып. 2.

г. Москва

Поступила 23/XI 1983 г.,
в окончательном варианте — 21/III 1989 г.

УДК 624.131+539.215

Г. М. Ляхов

ОБ УЧЕТЕ ПЕРЕМЕННОЙ ВЯЗКОСТИ В ДИНАМИКЕ ГРУНТОВ И ПОРИСТЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД

Анализ опытов показывает, что объемная вязкость грунтов, горных пород, льда, снега не является константой среды, она меняется в процессе нагружения.

Ниже проводится усовершенствование модели твердой нелинейной вязкопластической многокомпонентной среды, предназначенной для описания волновых процессов [1], введением переменной объемной вязкости. Принято, что вязкость меняется

(возрастает) при смещении состояния среды в процессе нагружения от динамической к статической диаграмме объемного сжатия. При таком подходе волновые процессы описываются системой гиперболических квазилинейных уравнений в частных производных, как и при постоянной вязкости. Это позволяет получить решение широкого класса волновых задач.

1. Определение объемной вязкости по экспериментальным данным. Изменение коэффициента объемной вязкости η_L в зависимости от режима нагружения отмечалось во многих экспериментальных работах. В [2] показано, что при увеличении в 3 раза времени нарастания взрывной нагрузки η_L песчаного грунта увеличивается в 5 раз. В горных породах [3] при одном и том же уровне напряжений вязкость возрастает в десятки раз с увеличением длительности нагрузки. В то же время с ростом напряжения вязкость уменьшается. При одинаковом максимальном напряжении в лессовых и суглинистых грунтах η_L увеличивается в несколько раз при уменьшении скорости нагружения [1, 4].

Рассмотрим результаты опытов [5, 6], в которых определялись скорость распространения c и декремент поглощения Δ плоских волн разной частоты f , создаваемых синусоидальной нагрузкой в мерзлых грунтах и во льду, и по которым можно найти вязкость, закономерность ее изменения в зависимости от режима нагружения.

Опыты соответствовали малым деформациям ε от 10^{-7} до $5 \cdot 10^{-4}$. В этой области можно пренебречь нелинейностью предельных диаграмм сжатия и необратимостью деформаций и применять модель стандартного линейного тела, если вязкость считать постоянной. В случае одноосного деформированного состояния уравнение сжатия и разгрузки имеет вид

$$(1.1) \quad \dot{\varepsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{E_D} - \frac{\mu(\sigma - E_S \varepsilon)}{E_S} = 0,$$

где $E_D = c_D^2 \rho_0$ и E_S — предельные динамический (при $\dot{\sigma} \rightarrow \infty$) и статический (при $\dot{\sigma} \rightarrow 0$) модули сжатия; μ — параметр вязкости; c_D — скорость волны при $f \rightarrow \infty$; ρ_0 — начальная плотность среды; σ — компонент напряжения в направлении распространения волны. Коэффициент η_L связан с параметром вязкости:

$$(1.2) \quad \eta_L = E_S(E_D - E_S)/E_D \mu = E_D(\gamma - 1)/\gamma^2 \mu, \quad \gamma = E_D/E_S.$$

При распространении волны в среде возникают неустановившиеся колебания, переходящие постепенно в установившиеся. Интенсивность угасания амплитуды σ установившихся колебаний определяется декрементом поглощения

$$(1.3) \quad \Delta = \alpha c / 2\pi f, \quad \alpha = \ln(\sigma_{i-1}/\sigma_i) / (r_i - r_{i-1})$$

(i — номер точки среды, c — скорость установившихся колебаний, r — расстояние).

В стандартном линейном теле Δ и $\mu/2f$ связаны уравнением [7]

$$(1.4) \quad \frac{\mu}{2f} = \frac{\pi}{4\gamma\Delta} [\gamma - 1 - \sqrt{(\gamma - 1)^2 - 16\gamma\Delta^2}].$$

Отсюда, определив из опыта Δ , при известных γ и f можно найти μ [7].

В табл. 1 приведены экспериментальные значения c и Δ при разных частотах, соответствующие области установившихся колебаний [5, 6] ($E = c^2 \rho_0$ — текущий модуль сжатия). Характеристики исследованных сред: 1 — лед, $\rho_0 = 900-904$ кг/м³, температура $T = -4^\circ\text{C}$, $E_D = 8,7 \cdot 10^9$ Н/м², $\gamma = 2$; 2 — лед, $\rho_0 = 770$ кг/м³, $T = -4^\circ\text{C}$, $E_D = 6,4 \cdot 10^9$ Н/м², $\gamma = 2,5$; 3 — илистые грунты Аляски и Манчестера, $\rho_0 = 1980$ кг/м³, влажность $w \sim 0,14$, $T = -4^\circ\text{C}$, $E_D = 18,5 \cdot 10^9$ Н/м², $\gamma = 7,5$; 4 — песок Оттавы, $\rho_0 = 2035$ кг/м³, $w = 0,12$, $T = -4^\circ\text{C}$, $E_D = 39 \cdot 10^9$ Н/м², $\gamma = 4,4$; 5 — илистый грунт, $\rho_0 = 1950$ кг/м³, $w = 0,2$, $T = -1^\circ\text{C}$, $E_D = 8,4 \cdot 10^9$ Н/м², $\gamma = 6$; 6 — тот же грунт, $T = -10^\circ\text{C}$, $E_D = 24 \cdot 10^9$ Н/м², $\gamma = 2,5$.

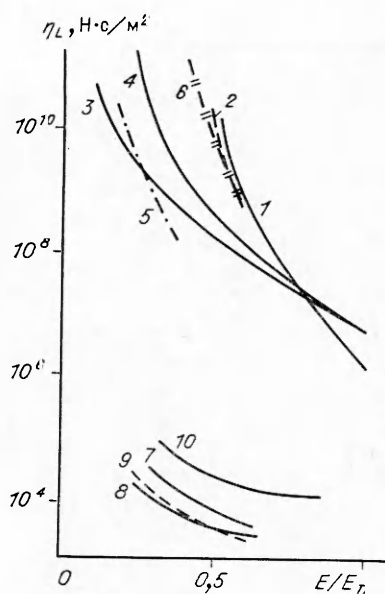
Таблица 1

Среда	f , Гц	c , м/с	$E \cdot 10^{-9}$, Н/м ²	Δ	μ , с ⁻¹	η_L , Н·с/м ²
1	0,1	2200	4,35	0,07	0,09	$2,2 \cdot 10^{10}$
	10	2300	4,7	0,03	3,8	10^9
	1000	2570	7,9	0,03	380	$5,6 \cdot 10^6$
	5000	3000	8,1	0,02	1570	$1,3 \cdot 10^6$
	10000	3080	8,6	0,02	1970	$1,1 \cdot 10^6$
2	0,3	2050	3,1	0,045	0,18	$1,5 \cdot 10^{10}$
	1	2100	3,3	0,03	0,44	$1,2 \cdot 10^{10}$
	6	2110	3,4	0,03	2,7	$2,6 \cdot 10^9$
3	0,1	1100	2,5	0,23	0,04	$5 \cdot 10^{10}$
	1	1200	3,0	0,22	0,26	$5,2 \cdot 10^9$
	10	1800	6,7	0,13	2,5	$9 \cdot 10^8$
	1000	2900	16,5	0,03	44	$4,8 \cdot 10^7$
	5000	2950	17,2	0,022	95	$2,2 \cdot 10^7$
	10000	3000	17,8	0,02	380	$5,5 \cdot 10^6$
4	0,1	2150	9,4	0,17	0,02	$1,1 \cdot 10^{11}$
	6	2300	11	0,06	1,3	$5,4 \cdot 10^9$
	1000	3900	31	0,045	140	$4,8 \cdot 10^7$
	5000	4150	35	0,03	530	$1,3 \cdot 10^7$
	10000	4200	37	0,02	980	$7,4 \cdot 10^6$
5	0,05	860	1,4	0,26	0,03	$2,3 \cdot 10^{10}$
	1,0	1060	2,2	0,19	0,5	$2,3 \cdot 10^9$
	10	1240	3,0	0,13	3,4	$2,4 \cdot 10^8$
6	0,05	2240	9,8	0,09	0,04	$1,4 \cdot 10^{11}$
	1,0	2430	11,5	0,07	0,6	$9,6 \cdot 10^9$
	10	2730	14,5	0,04	3,4	$1,7 \cdot 10^9$

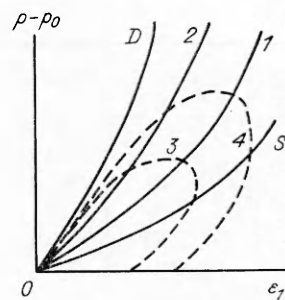
В соответствии с (1.4) по значениям Δ и f определены μ и η_L , приведенные в табл. 1. Из этих данных следует, что параметр вязкости и коэффициент вязкости мерзлых грунтов и льда не являются константами среды. Каждому значению f отвечает свое значение μ и η_L . С уменьшением частоты μ убывает, а η_L возрастает. Изменение обеих величин достигает нескольких порядков. Модель стандартно-линейного тела нужно усовершенствовать введением переменной вязкости. В зависимости от частоты колебаний меняется скорость волны и $E = c^2 \rho_0$, что позволяет представить μ и η_L как функции E/E_D . На рис. 1 приведены графики 1—10 зависимости $\eta_L = \eta_L(E/E_D)$ (их номера отвечают средам в табл. 1, 2).

Найдем по экспериментальным данным η_L при положительной температуре. В [4, 8] проводилось сжатие образцов на импульсной установке в условиях одноосного деформированного состояния при разных, но примерно постоянных в каждом опыте скоростях нагружения $\dot{\sigma}$. Измерялись деформации при различных напряжениях. В табл. 2 представлены характеристики исследованных сред: 7 — керченская глина, $\rho_0 = 1850$ кг/м³, $w = 0,23$, $E_D = 8,6 \cdot 10^7$ Н/м², $\gamma = 4,5$; 8 — керченская глина, $\rho_0 = 1840$ кг/м³, $w = 0,15$, $E_D = 7,5 \cdot 10^7$ Н/м², $\gamma = 7,5$; 9 — суглинок, $\rho_0 = 1830$ кг/м³, $w = 0,13$, $E_D = 9 \cdot 10^7$ Н/м², $\gamma = 7$; 10 — лесовидный суглинок, $\rho_0 = 1450$ кг/м³, $w = 0,035$, $E_D = 3 \cdot 10^8$ Н/м², $\gamma = 7$, данные по средам 7—9 соответствуют [4], по среде 10 — [8] (значения γ приближенные). Результаты опытов — значения $\dot{\sigma}$ и ε — отвечают $\sigma = 10 \cdot 10^5$ Н/м².

Предельные диаграммы сжатия среды примем линейными. Тогда из (1.1) при $\dot{\sigma} = \text{const}$ имеем уравнение, интегрируя которое при началь-



Р и с. 1



Р и с. 2

ном условии ($t = 0$) $\varepsilon = 0$, найдем зависимость деформации от напряжения:

$$\frac{\varepsilon - \sigma/E_S}{1 - e^{-\mu\sigma/\sigma}} = - \frac{\dot{\sigma}}{E_S \mu} \frac{\gamma + 1}{\gamma}.$$

Величина μ определяется из этого уравнения. Полученные значения μ и η_L приведены в табл. 2. Принято $\sigma/\varepsilon E_D = E/E_D$.

На рис. 1 графики 7—10 отвечают зависимости $\eta_L = \eta_L(E/E_D)$ в немерзлых

грунтах. Анализ опытных данных показывает, что η_L немерзлых грунтов не является константой среды. С уменьшением отношения $\sigma/\varepsilon E_D = E/E_D$, что соответствует смещению состояния среды в плоскости σ, ε от динамической к статической диаграмме сжатия, η_L возрастает. На динамической диаграмме η_L — конечная величина.

Значения η_L существенно зависят от свойств среды — гранулометрического состава, пористости, влажности и температуры. В лессовидном суглинке малой влажности (среда 10) цементация минеральных частиц, характеризующая прочностные свойства грунта, выше, чем в более влажных грунтах (среды 7—10). Это обуславливает большие значения E_D и η_L .

С понижением температуры происходит постепенное замерзание поровой воды, при этом возрастают прочностные связи между минеральными частицами, E_D увеличивается в несколько раз, а η_L — на несколько порядков. При понижении температуры илистого грунта от -1 до -10°C (среды 5 и 6) E_D возрастает примерно в 3 раза, а η_L — на полтора-два порядка. В мерзлых грунтах и во льду η_L на несколько порядков выше, чем в немерзлых.

Т а б л и ц а 2

Среда	$\dot{\sigma} \cdot 10^{-5},$ Н/(м²·с)	ε	E/E_D	$\mu, \text{с}^{-1}$	$\eta_L \cdot 10^{-4},$ Н·с/м²
7	2 000	0,034	0,34	630	2,3
	8 160	0,027	0,43	1700	0,9
	13 900	0,02	0,58	2200	0,7
	30 200	0,019	0,61	4500	0,3
8	7 040	0,052	0,26	1300	0,7
	13 800	0,034	0,39	1600	0,5
	40 300	0,020	0,67	3000	0,2
9	4 300	0,042	0,26	500	2,2
	18 300	0,03	0,37	2100	0,5
	43 900	0,021	0,53	3400	0,2
10	2 500	0,01	0,33	400	9,2
	15 000	0,006	0,55	1300	2,8
	20 000	0,004	0,83	2200	1,6

Т а б л и ц а 3

Среда	$\eta_{LD} \cdot 10^{-5},$ Н·с/м ²	m	Среда	$\eta_{LD} \cdot 10^{-5},$ Н·с/м ²	m
1	10	14	6	9	14
2	10	13	7	0,02	2,3
3	54	4,5	8	0,015	1,5
4	70	6,5	9	0,013	2,0
5	1,1	7,5	10	0,1	2,1

С увеличением E_D происходит одновременно уменьшение γ , т. е. сокращается различие между предельными динамическим и статическим модулями сжатия, что приводит к уменьшению потерь энергии при распространении волн. Зависимость η_L от E/E_D в процессе нагружения можно приближенно представить как

$$(1.5) \quad \eta_L = \eta_{LD} (E/E_D)^{-m}, m > 1.$$

Каждому значению E отвечает свое значение η_L .

В соответствии с этим предлагается модель стандартного линейного тела (1.1) усовершенствовать введением переменной вязкости, уравнение сжатия и разгрузки принимает вид

$$(1.6) \quad \dot{\varepsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{E_D} - \mu_D \left(\frac{\sigma}{\varepsilon E_D} \right)^m \frac{\sigma - E_S \varepsilon}{E_S} = 0, \quad \mu_D = \frac{E_D (\gamma - 1)}{\gamma^2 \eta_{LD}}, \quad \frac{\sigma}{\varepsilon E_D} = \frac{E}{E_D}.$$

Уравнение (1.6), как и (1.1), относится к области малых нагрузок, когда предельные диаграммы можно принять линейными.

Величины η_{LD} и m исследованных сред приведены в табл. 3. Изменение η_L в процессе нагружения учитывалось в моделях сред ранее. В [9] предложена модель жидкости и водонасыщенного грунта, содержащих пузырьки газа. Принято, что при волновых процессах коэффициент вязкости растет при сжатии пузырьков, т. е. при увеличении деформации среды.

При описании поведения грунтов и льда [10—12] η_L считается возрастающим с увеличением времени действия нагрузки. В [11] вместо (1.1) для описания поведения льда рекомендуется уравнение, имеющее в наших обозначениях вид

$$\dot{\varepsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{E_D} - \frac{\mu}{t^{2/3}} \frac{\sigma - E_S \varepsilon}{E_S} = 0.$$

Опыты, однако, показывают, что в начальный момент времени $\eta_L \neq 0$.

Описание механизма деформирования, по-видимому, будет более точным, если η_L рассматривать как функционал, определяемый всей историей нагружения. В этом случае возникают трудности с нахождением материальных функций модели и решением волновых задач на ЭВМ.

Предлагаемый учет переменной вязкости (уравнение (1.6)) в зависимости от отношения E/E_D является приближенным, однако он отражает основные закономерности изменения η_L .

2. Усовершенствование модели многокомпонентной среды с нелинейными предельными диаграммами. В модели [1] принимается, что объемная деформация многокомпонентных сред — грунтов, льда, снега — складывается из деформации свободного порового пространства ε_1 и деформаций $\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ материала жидкого компонента, твердых минеральных частиц и льда:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^4 \alpha_i \varepsilon_i, \quad \sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1,$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ — объем свободного порового пространства, воды, минеральных частиц и льда в единице объема среды. В мерзлых грунтах $\alpha_4 = 0$, во льду и снегу $\alpha_2 = 0$ и $\alpha_3 = 0$.

Деформация ε_1 , связанная со смещением и переукладкой твердых и жидких частиц, протекает немгновенно. Это приводит к различию предельных динамической и статической диаграмм объемного сжатия свободного порового пространства. Диаграммы аппроксимируются уравнениями

$$p - p_0 = f_S(\varepsilon_1) = \frac{\rho_0 c_S^2}{\gamma_S} [(\varepsilon_1 + 1)^{-\gamma_S} - 1] \quad \text{при } \dot{p} \rightarrow 0,$$

$$p - p_0 = f_D(\varepsilon_1) = \frac{\rho_0 c_S^2}{\gamma_S} [(\varepsilon_1 + 1)^{-\gamma_S} - 1] + k\varepsilon \quad \text{при } \dot{p} \rightarrow \infty, \quad k < 0.$$

Уравнения сжатия материала остальных компонентов не зависят от скорости нагружения:

$$p - p_0 = f(\varepsilon_i) = \frac{\rho_i c_i^2}{\gamma_i} [(\varepsilon_i + 1)^{-\gamma_i} - 1], \quad i = 2, 3, 4.$$

В соответствии с приведенными опытными данными в области малых напряжений, где предельные диаграммы линейны, η_L приближенно можно принять постоянным вдоль прямых $\sigma = E\varepsilon$.

Положим, что в случае нелинейных предельных диаграмм коэффициент η_L неизменен вдоль кривых

$$(2.1) \quad p - p_0 = \frac{\rho_0 c_S^2}{\gamma_S} [(\varepsilon_1 + 1)^{-\gamma_S} - 1] + \kappa \varepsilon_1, \quad \kappa \leq 0, \quad |\kappa| \leq |k|,$$

лежащих между предельными диаграммами. Изменение η отвечает уравнению, аналогичному (1.5):

$$(2.2) \quad \eta = \eta_D \left(\frac{-\rho_0 c_S^2 + \kappa}{-\rho_0 c_S^2 + k} \right)^{-m}.$$

На рис. 2 D и S — предельные динамическая и статическая диаграммы сжатия свободного порового пространства, 1 и 2 — линии постоянных η , определяемые (2.1), 3 и 4 — диаграммы, реализуемые при прохождении волн. На динамической диаграмме достигается наименьшее η_D , а на статической — наибольшее η_S :

$$\eta_S = \eta_D \frac{-\rho_0 c_S^2 + k}{-\rho_0 c_S^2}.$$

Из (2.1) и (2.2) следует

$$(2.3) \quad \eta = \eta_D \left[\frac{-\rho_0 c_S^2 + \frac{p - p_0 - f_S(\varepsilon_1)}{\varepsilon_1}}{-\rho_0 c_S^2 + k} \right]^{-m} = \eta_D \left[\frac{-\rho_0 c_S^2 + \frac{\psi(p, V)}{\varepsilon_1}}{-\rho_0 c_S^2 + k} \right]^{-m}.$$

Уравнение объемного сжатия среды [1] имеет вид

$$(2.4) \quad \dot{\varepsilon} = \frac{\dot{V}}{V_0} = \varphi(p, V) \dot{p} - \frac{\alpha_1 \lambda(p, V)}{\eta} \psi(p, V),$$

$$\text{где} \quad \varphi(p, V) = \alpha_1 \left(\frac{df_D}{d\varepsilon_1} \right)^{-1} - \sum_{i=2}^4 \frac{\alpha_i}{\rho_i c_i^2} \left[\frac{\gamma_i (p - p_0)}{\rho_i c_i^2} + 1 \right]^{-(1+\gamma_i)/\gamma_i};$$

$$\lambda(p, V) = \left(\frac{df_D}{d\varepsilon_1} \right)^{-1} \frac{df_S}{d\varepsilon_1}; \quad \psi(p, V) = p - p_0 - f_S(\varepsilon_1);$$

$$f_S(\varepsilon_1) = \frac{\rho_0 c_S^2}{\gamma_S} [(\varepsilon_1 + 1)^{-\gamma_S} - 1]; \quad f_D(\varepsilon_1) = f_S(\varepsilon_1) + k\varepsilon_1;$$

$$\varepsilon = (V - V_0)/V_0; \quad p - p_0 = -(\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z)/3$$

(η отвечает (2.3)). В опытах обычно определяется η_L . Коэффициент η относится к объемному деформированию свободного порового пространства, а η_L — к продольному сжатию среды в целом при напряжении σ_r . В соот-

ветствии с этим связь между ними запишем как

$$\eta_L = \frac{3\eta}{\alpha_1(1+k_\theta+k_z)}, \quad k_\theta = \sigma_\theta/\sigma_r, \quad k_z = \sigma_z/\sigma_r.$$

В модели [1] принимается, что уравнения разгрузки компонентов совпадают с уравнениями нагрузки (2.4). Разгрузка свободного порового пространства происходит по уравнению

$$\varepsilon_1 + 1 = \left[\frac{\gamma_R(p-p_0)}{\rho_0 c_R^2} + 1 \right]^{-1/\gamma_R} + \left[\frac{\gamma_S(p_m-p_0)}{\rho_0 c_S^2} + 1 \right]^{-1/\gamma_S} - \left[\frac{\gamma_R(p_m-p_0)}{\rho_0 c_R^2} + 1 \right]^{-1/\gamma_R}, \quad \gamma_R \geq \gamma_S.$$

Она начинается, когда $|\varepsilon_1|$ достигает максимального значения $|\varepsilon_{1m}|$ при $p = p_m$. При этих предпосылках уравнение объемной разгрузки имеет вид (2.4). Определяющие функции:

$$\begin{aligned} \varphi(p, V) &= \alpha_1 \left(\frac{df_D}{d\varepsilon_1} - \frac{df_S}{d\varepsilon_1} + \frac{df_R}{d\varepsilon_1} \right)^{-1} - \sum_{i=2}^4 \frac{\alpha_i}{\rho_i c_i^2} \left[\frac{\gamma_i(p-p_0)}{\rho_i c_i^2} + 1 \right]^{-(1+\gamma_i)/\gamma_i}, \\ \lambda(p, V) &= \left(\frac{df_D}{d\varepsilon_1} - \frac{df_S}{d\varepsilon_1} \right) \left(\frac{df_D}{d\varepsilon_1} - \frac{df_S}{d\varepsilon_1} + \frac{df_R}{d\varepsilon_1} \right)^{-1}, \\ f_R(\varepsilon_1) &= \frac{\rho_0 c_R^2}{\gamma_R} \left\{ \left[\varepsilon_1 + 1 - \left(\frac{\gamma_S(p_m-p_0)}{\rho_0 c_S^2} + 1 \right)^{-1/\gamma_S} + \left(\frac{\gamma_R(p_m-p_0)}{\rho_0 c_R^2} + 1 \right)^{-1/\gamma_R} \right]^{-\gamma_R} - 1 \right\}. \end{aligned}$$

При разгрузке η считается постоянным, его значение отвечает достигнутому при $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1m}$. Если точка $p_m - p_0$, ε_{1m} лежит за диаграммой статического сжатия, то $\eta = \eta_S$.

Принимается условие пластичности Мизеса — Шлейхера в виде

$$(2.5) \quad S_r = \frac{k^*(p-p_0)}{1+k^*(p-p_0)/(p^*-p_0)}, \quad S_r = \sigma_r + p - p_0.$$

При $p-p_0 \rightarrow 0$, $p-p_0 = p^*-p_0$ и $p-p_0 \rightarrow \infty$ коэффициент бокового давления k_θ равен $(2-k^*)/(2(k^*+1))$, $(2+k^*)/(2(2k^*+1))$ и 1 соответственно [13, 14].

При решении задач с цилиндрической симметрией принимается

$$(2.6) \quad \sigma_z = (\sigma_r + \sigma_\theta)/2.$$

Константы среды определяются из опыта.

Уравнения (2.4)–(2.6) совместно с основными уравнениями движения сплошной среды образуют замкнутую систему, позволяющую решать на ЭВМ волновые задачи с плоскими, сферическими и цилиндрическими волнами с учетом переменной вязкости теми же методами, что и при постоянной вязкости.

Решение задач о распространении волн в нелинейной многокомпонентной среде, согласно модели [1], при постоянной вязкости получены в [13–15]. Расчеты показывают, что при увеличении постоянного значения η в 50 раз максимальное напряжение сферической взрывной волны при $\sigma_r \sim 10 \cdot 10^5$ Н/м² меняется на 30–40 %. Если за постоянное η принять некоторое среднее значение, лежащее между η_S и η_D , то отклонения от расчетов с переменной вязкостью будут, по-видимому, того же порядка. Следует отметить, что влияние изменения η на параметры волны зависит от ее длины, а в случае взрывной волны — от массы заряда. Это должно сказаться на отклонении параметров волн от законов подобия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляхов Г. М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. — М.: Наука, 1982.
2. Ляхов Г. М. Определение вязких свойств грунта // ПМТФ. — 1968. — № 4.
3. Белинский И. В., Михалюк А. В., Христофоров Б. Д. Вязкость горных пород при деформационных процессах // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1975. — № 8.
4. Вовк А. А., Михалюк А. В., Черный Г. И. Действие крупномасштабных взрывов в массиве горных пород. — Киев: Наук. думка, 1974.
5. Vinson T. S. Parameter effects on dynamic properties of frozen soils // Proc. ASCE. J. Geotechn. Engng Div. — 1978. — V. 104, N 10.
6. Chaikowski R. L., Vinson T. S. Dynamic properties of frozen silt under cyclic loading // Proc. ASCE. J. Geotechn. Engng Div. — 1980. — V. 106, N 9.
7. Коган С. Я. Сейсмическая энергия и методы ее определения. — М.: Наука, 1975.
8. Рыков Г. В., Скобеев А. М. Измерение напряжений в грунтах при кратковременных нагрузках. — М.: Наука, 1978.
9. Ляхов А. Г. Взаимодействие волны в многокомпонентной двухфазной среде с преградой // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1981. — № 3.
10. Михалюк А. В. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. — Киев: Наук. думка, 1980.
11. Голд Л., Синха Н. Реологическое поведение льда при малых деформациях // Физика и механика льда. — М.: Мир, 1983.
12. Нефедов В. В. Плоские волны в нелинейных вязких многокомпонентных средах // ПМТФ. — 1987. — № 6.
13. Крымский А. В., Ляхов Г. М. Волны при подземном взрыве // ПМТФ. — 1984. — № 4.
14. Григорян С. С., Крымский А. В., Ляхов Г. М. Вопросы подобия волн в пористых многокомпонентных средах // Изв. АН СССР. МТТ. — 1985. — № 6.
15. Ляхов Г. М., Лучко И. А., Плаксий В. А. и др. Сферические взрывные волны в твердой многокомпонентной вязкопластической среде // Прикл. механика. — 1986. — № 5.

г. Москва

Поступила 31/V 1988 г.,
в окончательном варианте — 29/XII 1988 г.

УДК 624.131+539.215

А. Ф. Новгородов, Г. В. Рыков, А. Н. Шейнин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЖИМАЕМОСТИ ГРУНТОВ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

В [1, 2] представлены результаты экспериментальных исследований песчаных грунтов различной влажности и плотной глины при кратковременных динамических нагрузках, снабженные необходимыми статистическими характеристиками точности и надежности, которые, как показано в [2, 3], существенны для дальнейших количественных оценок вязкопластических свойств этих сред. В проведенных опытах каждый из изученных грунтов подвергался динамическим испытаниям только при одном режиме деформирования.

Ниже приводятся результаты дополнительных исследований тех же грунтов, проводившихся при режимах деформирования, отличных от описанных в [1, 2]. Кроме того, нами впервые использовалась специально разработанная автоматизированная система сбора и обработки измерительной информации, что позволило не только существенно ускорить процесс обработки результатов измерений, но и повысить их точность (в частности, при испытаниях образцов глины).

1. Экспериментальным исследованиям подвергались образцы плотной глины ненарушенной структуры с массовой плотностью скелета $\rho_0 = 1,70 \text{ г/см}^3$, весовой влажностью $w = 0,22$, а также песчаный грунт с $\rho_0 = 1,50\text{--}1,52 \text{ г/см}^3$, $w = 0,05$ того же гранулометрического состава, что и в [1, 2]. Глина, как и в [2], доставлялась в лабораторию в виде запарафинированных монолитов ненарушенной структуры, из которых затем вырезались образцы для испытаний, проводимых в установке квазистатического типа УДН-150 [1, 2]. Установка в общем виде представляет вер-